УДК 574.632

ВЛИЯНИЕ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА МАКРОЗООБЕНТОС

Д.С. Воробьев

Томский государственный университет
E-mail: dan@bio.tsu.ru

Обобщены данные по воздействию нефти и нефтепродуктов на донных беспозвоночных животных. Рассмотрено влияние этих загрязнителей на характеристики донных сообществ, отражена зависимость показателей макрозообентоса от качественного состава нефти или нефтепродуктов, их концентрации и периодичности загрязнения; рассмотрена роль донных организмов в процессах самоочищения водных объектов.

Под загрязнением водоемов понимается ухудшение их экономического значения и биосферных функций в результате антропогенного поступления в них вредных веществ. Экологическое действие загрязняющих веществ проявляется на организменном, популяционном, биоценотическом и экосистемном уровне. На *организменном* уровне происходит нарушение отдельных физиологических функций, изменение поведения, увеличение смертности вследствие прямого отравления или уменьшения устойчивости. На *популяционном* уровне загрязнение может вызывать изменение численности и биомассы, рождаемости и смертности, половой и размерной структуры, типа динамики и ряда функциональных свойств. На *биоценотическом* уровне загрязнение сказывается на структуре и функциях сообщества, поскольку одни и те же загрязняющие вещества неоднородно влияют на компоненты биоценоза. В конечном счете, происходит *деградация экосистем* – ухудшение их как среды обитания, обесценивание в хозяйственном отношении [1].

Нефть является сложной смесью парафиновых, циклопарафиновых, ароматических углеводородов с простыми и разветвленными цепями. Помимо этих основных составляющих, она содержит соединения серы и азота, органические кислоты, микроэлементы. Нефти могут также содержать нафтеновые кислоты и фенольные соединения, хлороформенные битумоиды, в составе которых имеются такие экологически особо опасные соединения, как полиароматические углеводороды [2].

Приконтурные воды за счет высокой восстановительной способности углеводородов обогащаются органическими кислотами, бензолом, толуолом, фенолом и другими органическими веществами. В них также отмечаются заметные аномалии по содержанию серы, фосфора, тяжелых металлов. Загрязнение приконтурными водами способно сильно изменять химический состав подземных вод [3].

Нефтяные компоненты при поступлении в поверхностные воды находятся в различных формах (масляная, растворенная, эмульгированная, адсорбированная). В начальный период 60...70 % поступившей нефти содержится в водной массе в растворенном, эмульгированном, адсорбированном состоянии. Обычно эмульгированных компонентов в 2 раза больше растворенных. Последние состоят на 80...90 % из ароматических углеводородов (бензол, толуол, этилбензол, ксилол и др.), обладающих высокой токсичностью в связи с повышенной способностью к растворению в воде. Поступившая в поверхностные воды нефть вступает в общую цепь сложных и мало исследованных по длительности процессов (испарение, растворение, эмульгирование, окисление, образование агрегатов, седиментация, биодеградация) [4]. Эти процессы зависят как от состава и количества нефти в водной среде, так и от условий в водоемах (наличия в воде коллоидов, взвешенных частиц, планктона, температуры, солнечного освещения и т.д.). Известно, что во всех формах миграции происходит накопление устойчивых к биологическому разложению компонентов (смол, асфальтенов, парафинов и др.), причем максимум нефтепродуктов концентрируется в донных отложениях. При хроническом загрязнении водотоков углеводороды накапливаются в донных отложениях на участках с замедленным течением, где активно проходят процессы илонакопления. Размыв загрязненных донных отложений вызывает вторичное загрязнение вод и их перенос далее вниз по течению реки, что зависит от диаметра частиц и скоростей речного потока. В стоячих водоемах, загрязнение донных отложений нефтью приурочено, как правило, к прибрежным, наиболее биологически продуктивным зонам. При крупных авариях, когда водоем полностью покрыт нефтью и не приняты оперативные меры по ее сбору, донные отложения покрываются слоем нефти и наблюдается полная деградация донных сообществ.

К факторам, существенно сдерживающим скорость деградации нефти, относятся низкая прозрачность воды, сдерживающая фотоокисление (особенно в половодье), а также пониженная температура воды и дефицит кислорода, приводящий в зимний период к заморам. Установлено, что при отсутствии ультрафиолетового излучения скорость химической деструкции нефти снижается почти в 2 раза [5], а со снижением температуры на 10° – в 2...4 раза [6]. Пониженная температура существенно снижает и биохимические процессы, связанные с деструкцией и трансформацией различных веществ. В анаэробных условиях или дефиците кислорода происходит не окисление, а сульфатредукция и метанообразование. При этом в воде накапливаются токсичные для гидробионтов вещества

(меркаптаны, сероводород и др.) [7]. Наиболее экологически опасными являются хорошо растворимые, трудно окисляемые нефтяные углеводороды – водорастворимая фракция может содержать до 90 % токсичных ароматических соединений. В нижних горизонтах локализуется сверхмедленно окисляемая фракция, обогащенная полиараматическими углеводородами [8, 9].

Важная роль в распределении нефтепродуктов в водотоках принадлежит физическим процессам – сорбция нефти взвесью и ее осаждение. По мере удаления от источников загрязнения концентрация нефтепродуктов во взвеси снижается, что обусловлено испарением их летучих компонентов, а также биохимическим окислением. Опытами установлено, что 1 г взвеси и донных отложений сорбирует до 12...25 мг солярового масла [10]. Однако на взвеси чаще всего сорбируются липкие смолистые компоненты нефти [11]. Не исключено, что промежуточные продукты распада органического детрита, захороненного в донных отложениях, могут определяться как нефтепродукты, хотя они не являются компонентами загрязнения. Полициклические ароматические углеводороды могут образовываться из захороненной биоты при участии микроорганизмов [12].

Основная роль в деструкции нефтепродуктов в воде принадлежит биогенному фактору, и в первую очередь микроорганизмам-деструкторам. Как отмечают И.А. Кузнецова и А.Н. Дзюбан [13], бактериальные сообщества четко выявляют «концентрационную границу» нефтяного загрязнения, ниже которой микробиальные ценозы вода-грунт еще справляются с поступающими в донные отложения углеводородами и стабилизируют ситуацию – 40...60 мг/кг сухого грунта. При избыточном нефтяном загрязнении возрастает численность и биомасса бактерий, однако снижается их общая активность. Накапливаются токсичные продукты анаэробного распада [14].

За летний период микроорганизмами поверхностных вод может быть окислено от 1,2 до 2,5 мг нефтяных углеводородов в 1 л. Однако, как отмечают сами авторы, данная закономерность прослежена на легко доступных для микроорганизмов углеводородах, скорость деструкции углеводородов других классов будет более низкой [15]. В связи с активной трансформацией и деградацией нефтепродуктов изменяется их структура, получаются все более и более устойчивые к биологической переработке вещества, либо токсичные продукты [16].

Загрязнение донных осадков нефтью и нефтепродуктами приводит к перестройке бентосных сообществ, как в морских, так и в пресноводных экосистемах [17–19]. Бентосные организмы значительно выносливее к нефтяному загрязнению, чем планктонные, которые быстро гибнут в концентрациях нефти порядка 0,01...0,001 мг/л [20, 21]. На гаммаридах было показано, что молодь гораздо чувствительнее к нефтепродуктам, чем взрослые особи [22], что вполне соответствует положениям, дополняющих «закон» толерантности [23].

Многие структурные характеристики макрозообентоса – видовое разнообразие, численность, биомасса, зависят от физических свойств грунта и количества преобразованного бактериями легкоусвояемого органического вещества в нем, так и от качества отложений. В основе критериев качества донных отложений должны быть показатели, учитывающие уровень количественного развития зообентоса. Для грунтов с признаками нефтяного загрязнения характерна бедность видового состава при высокой численности и биомассе выносливых к загрязнению форм, а при сильном хроническом загрязнении наблюдается угнетение всего сообщества, включая устойчивые формы [24–26]. При загрязнении ароматическими углеводородами снижаются значения численности бентоса, типичные реофильные виды донных беспозвоночных заменялись высокотолерантными к этим загрязнителям видам [27, 28]. Относительная токсичность нефти для морских организмов прямо коррелирует с содержанием в ней ароматических углеводородов [29].

Л.С. Кравцовой и др. [30] исследовалось влияние водорастворимых битумов в донных отложениях на распределение гидробионтов. Максимальные значения численности и биомассы олигохет, хирономид и моллюсков отмечены при содержании водорастворимых битумов 40 мг/кг грунта. При более высоких концентрациях (82 мг/кг) происходило уменьшение количественных показателей, как отдельных групп, так и зообентоса в целом. Однако, влияние водорастворимых битумов на группы зообентоса неоднозначно. Так, концентрации 40 мг/кг, вероятно, создают оптимальные условия для развития микрофлоры, повышающей пищевую ценность детрита, что способствует обилию гидробионтов. При дальнейшем возрастании содержания водорастворимых битумов наблюдается снижение численности как у моллюсков, так и хирономид; у олигохет эта тенденция выражена слабо. Аналогичные закономерности прослежены и другими исследователями [31]. При загрязнении донных отложений дизельным топливом смертность личинок хирономид (на примере *Chironomus riparins*) достоверно была выше контрольной при содержании нефтепродуктов 220...320 мг/кг [32].

Нефть разных месторождений по-разному влияет на донных беспозвоночных, прежде всего это связано с различным фракционным составом углеводородов. Нефть с высоким содержанием нафтеновых кислот, смол и серы была самой ядовитой для гидробионтов [31]. Нефть не является специфическим токсикантом, поражающим какую-либо одну систему, а вызывает несогласованные изменения в содержании белка, свободных нуклеотидов и нуклеиновых кислот [33].

Помимо микробиальных деструкторов нефти, донные организмы также участвуют в преобразовании нефти в донных осадках. Многие исследователи уже давно отмечали, что гидробионты способны накапливать в своем организме нефтепродукты.

Так, полихеты способствуют преобразованию нефти в грунте. Эксперимент показал, что ароматические структуры органического вещества фекалий нереисов из опыта приобретали иной характер, чем исходных. Полихеты перерабатывали нефтепродукты, а именно тяжелые фракции [34].

Проходя через организм мидий, углеводороды нефти претерпевают более глубокие качественные и количественные изменения по сравнению с трансформацией нефти в морской воде. Накопление углеводородов мидиями зависит от нескольких факторов: степени их исходного загрязнения углеводородами нефти; физиологического состояния, связанного с отсутствием (недостатком) питательных веществ; химического спектра углеводородов в нефтях и нефтепродуктах. Моллюски способны продолжительное время сохранять в своем теле нефть [35, 36].

Одно из интереснейших направлений в современной гидробиологии – восстановление гидрофауны нефтезагрязненных водоемов. В 2004–2005 гг. впервые в мировой практике «Научно-техническим объединением «Приборсервис» (г. Томск) была испытана флотационная технология очистки донных отложений от нефти [37–39]. Успешные результаты работ подтверждались не только гидрохимическими, но и гидробиологическими данными. Сотрудниками Томского государственного университета в 2003–2005 гг. проводились исследования донной фауны озера Щучье (Усинский район, республика Коми). До начала очистных работ концентрация нефти в донных отложениях превышала 50 г/кг, а на мелководных участках 125 г/кг. После проведения комплекса очистных работ, на прибрежных участках (до 2 м), где содержание нефти в составе донных отложений было снижено до 2 г/кг (более чем в 60 раз), были обнаружены представители малощетинковых червей (олигохеты), хирономиды, двустворчатые моллюски. Следует отметить, что основу бентоса по численности (90...100 %) и биомассе (80...100 %) организмов составляли олигохеты. Данный факт подтверждает исследования других гидробиологов – олигохеты одни из наиболее выносливых групп к нефтяному загрязнению, которые также активно участвуют в преобразовании токсичных нефтепродуктов в донных осадках.

Донные беспозвоночные подвержены влиянию нефти и нефтепродуктов, которое выражается в изменении количественных и качественных характеристик донных сообществ, его структуре, причем это влияние зависит от качественного состава нефти или нефтепродуктов, их концентрации и периодичности загрязнения. Важная роль отводится донным организмам в процессах самоочищения водных объектов от данных загрязнителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Константинов А.С. Общая гидробиология. – М.: Высшая школа, 1986. – 472 с.
2. Кузин И.Л., Яковлев О.Н. Характер загрязнения окружающей среды при разведке нефтегазоконденсатных месторождений на севере Западной Сибири // Многоцелевые гидрогеохимические исследования в связи с поиском полезных ископаемых и охраной подземных вод. – Томск, 1993. – С. 82.
3. Белоусова А.П. Изменение химического состава подземных вод нефтяного месторождения под влиянием техногенеза // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28. – № 1. – С. 88–98.
4. Егоров Н.Н., Шипулин Ю.К. Особенности загрязнения природных вод и грунтов нефтепродуктами // Водные ресурсы. – 1998. – Т. 25. – № 5. – С. 598–602.
5. Сохина Л.И., Щербаков О.Н. Особенности деструкции нефти в прибрежных районах Баренцева моря // Мониторинг окружающей среды в условиях Крайнего Севера / Под ред. В.В. Крючкова. – Мурманск, 1984. – С. 15–16.
6. Морозов Н.В., Николаев В.Н. Влияние условий среды на развитие нефтеразлагающих микроорганизмов // Гидробиологический журнал. – 1978. – Т. 14. – № 4. – С. 55–61.
7. Кондратьева Л.М. Вторичное загрязнение водных экосистем // Водные ресурсы. – 2000. – Т. 27. – № 2. – С. 221–231.
8. Михайлова Л.В., Шорохова О.В. Особенности состава и трансформации в водорастворимой фракции тюменской нефти // Водные ресурсы. – 1992. – № 2. – С. 130–139.
9. Ващенко М.А. Загрязнение залива Петра Великого Японского моря и его биологические последствия // Биология моря. – 2000. – Т. 26. – № 3. – С. 149–159.
10. Зюлькина В.Я. Значение взвешенных наносов и донных отложений в самоочищении р. Селенги от нефтепродуктов // Гидробиологический журнал. – 1975. – № 3. – С. 63–65.
11. Мочалова О.С., Антонова Н.М., Гурвич Л.М. Роль диспергирующих средств в процессах трансформации и окисления нефти // Водные ресурсы. – 2002. – Т. 29. – № 2. – С. 221–225.
12. Лахиджани Х.К., Немировская И.А., Красножон Т.Ф. Углеводороды в донных отложениях Иранского побережья Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1999. – Т. 26. – № 1. – С. 104–107.
13. Кузнецова И.А., Дзюбан А.Н. Микробиологическая оценка последствий нефтяного загрязнения водоемов // Современные проблемы гидробиологии Сибири: Тез. докл. Всесоюз. конф. – Томск, 2001. – С. 123–124.
14. Дзюбан А.Н., Крылова И.Н. Оценка состояния бактериопланктона и бактериобентоса Рыбинского водохранилища в районе г. Череповец (Вологодская обл.) // Биология внутренних вод. – 2000. – № 4. – С. 68–79.
15. Ильинский В.В., Поршнева О.В., Семененко М.Н. Углеводородокисляющие микроорганизмы в прибрежных и открытых водах Можайского водохранилища: активность и вклад в процессы естественного очищения в летний период // Водные ресурсы. – 1998. – Т. 25. – № 3. – С. 335–338.
16. Попов А.Н. Особенности самоочищения рек // Охрана речных вод. – Новосибирск: Наука, 1982. – С. 17–20.
17. Миловидова Н.Ю., Кирюхина Л.Н. Влияние нефти и нефтепродуктов на донные осадки и макрозообентос в природных условиях // Проблемы химического загрязнения вод мирового океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – С. 86–124.
18. Попков В.К., Воробьев Д.С., Лукьянцева Л.В., Рузанова А.И. Бассейн реки Васюган (средняя Обь) как модель пойменно-речной системы для изучения влияния нефтяного загрязнения на водные сообщества // Эколого-биогеохимические исследования в бассейне Оби / Под ред. В.В. Зуева. – Томск, 2002. – С. 220–245.
19. Рузанова А.И., Воробьев Д.С. Трансформация донных сообществ в условиях нефтяного загрязнения // Экология пойм си-

бирских рек и Арктики / Под ред. В.В. Зуева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – С. 71–78.

20. Калугина А.А., Миловидова Н.Ю., Свиридова Т.В., Уральская И.В. О влиянии загрязнений на морские организмы Новороссийской бухты Черного моря // Гидробиологический журнал. – 1967. – № 1. – С. 47–53.
21. Миловидова Н.Ю. Действие нефти на некоторых прибрежных ракообразных Черного моря // Гидробиологический журнал. – 1974. – № 4. – С. 96–100.
22. Смоляр Р.И. Выживаемость молоди и интенсивность размножения бокоплава Gammarus olivii M. Edwards при хронической нефтяной интоксикации // Гидробиологический журнал. – 1981. – Т. 17. – № 3. – С. 132–133.
23. Одум Ю. Основы экологии: Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 740 с.
24. Виноградов Г.А., Березина Н.А., Лаптева Н.А., Жариков Г.П. Использование структурных показателей бактерио- и зообентоса для оценки качества донных отложений (на примере водоемов Верхневолжского бассейна) // Водные ресурсы. – 2002. – Т. 29. – № 3. – С. 329–336.
25. Рузанова А.И. Сравнительная оценка методов биоиндикации загрязнения водоемов по донным сообществам // Чтения памяти Ю.А. Львова. – Томск, 1995. – С. 225–228.
26. Михайлова Л.В., Акатьева Т.Г., Рыбина Г.Е. Токсичность и генетическая опасность донных отложений малых рек в районе нефтедобычи // I съезд токсикологов России: Тез. докл. – М., 1998. – С. 300.
27. Duke B.M., Steevens J.A., Lotufo G.R., Bridges T.S. Toxicological Evaluation and Comparison of Explosives using Freshwater Macroinvertebrates // In: SETAC 21st Annual Meeting “Environmental Science in the 21st Century: Paradigms, Opportunities, and Challenges”, 12–16 November 2000, Nashville, TN, USA. Pensacola, FL, USA, SETAC Press, 2000. – P. 8.
28. Петрова И.В. Экспериментальное исследование влияния загрязненного дизельным топливом ила на гидрохимический режим и бентос (на примере Asellus aquaticus) // Известия ГосНИОРХ. – Л., 1981. – Вып. 173. – С. 102–107.
29. Вредные химические вещества. Углеводороды. Галогенопроизводные углеводородов: Справ. изд. / Под ред. В.А. Филова и др. – Л.: Химия, 1990. – 435 с.
30. Кравцова Л.С., Лезинская И.Ф., Кицук Т.И. Бентофауна на участках нефтегазопроявлений озера Байкал // Гидробиологический журнал. – 1988. – Т. 24. – № 5. – С. 90–93.
31. Касымов А.Г., Грановский С.И. О влиянии нефти на донных животных Каспийского моря // Гидробиологический журнал. – 1970. – № 5. – С. 96–99.
32. Гапеева М.В., Гребенюк Л.П., Ершов Ю.В., Томилина И.И. Токсикологическая и тератогенная оценка загрязнения донных отложений нефтепродуктами и ртутью на примере водохранилищ верхней и средней Волги // Биология внутренних вод. – 2001. – № 3. – С. 85–91.
33. Дивавин И.А., Ерохин В.Е. Изменение биохимических показателей некоторых прибрежных гидробионтов Баренцева моря при экспериментальной нефтяной интоксикации // Гидробиологический журнал. – 1978. – Т. 14. – № 5. – С. 73–77.
34. Георга-Копулос Л.А., Алемов С.В. Участие нереисов в преобразовании нефтяных смол в морских донных осадках // Гидробиологический журнал. – 1990. – Т. 26. – № 2. – С. 60–64.
35. Щекатурина Т.Л., Миронов О.Г. Аккумуляция углеводородов нефти двустворчатыми моллюсками Mytilus galloprovincialis L. // Гидробиологический журнал. – 1987. – Т. 23. – № 2. – С. 71–76.
36. Касымов А.Г., Лиходеева Н.Ф. Накопление нефти моллюсками // Гидробиологический журнал. – 1984. – Т. 20. – № 4. – С. 63–66.
37. Лушников С.В., Воробьев Д.С. Очистка донных отложений: первый шаг сделан // Экология и промышленность России. – 2005. – № 9. – С. 30–31.
38. Лушников С.В., Воробьев Д.С., Фадеев В.Н. Очистка донных отложений Заполярных водоемов от нефти // Экологическое состояние континентальных водоемов Арктической зоны в связи с промышленным освоением северных территорий: Тез. докл. Междунар. конф. – Архангельск, 21–25 июня 2005 г. – СПб., 2005. – С. 63.
39. Lushnikov S.V., Vorobyov D.S., Fadeev V.N. Remediation of Lake severely by oil spills: pilot project in Komi Republic (Russia) // Abstract book SETAC Europe 15th Annual Meeting, 22–26 May 2005, Lille, France. SETAC Pres, 2005. – P. 334.